

УДК 533.9.07

И.В. НИКИТИНЫХ, В.А. РЯБЫЙ

*НИИ прикладной механики и электродинамики Московского авиационного института (государственного технического университета), Москва, Россия*

### УТОЧНЁННАЯ ОЦЕНКА СРЕДНЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ АРГОНОВОЙ ПЛАЗМЫ НА СРЕЗЕ СОПЛА ВЫСОКОРЕСУРСНОГО ПЛАЗМАТРОНА

В ранее выполненной работе [1] измерена средняя проводимость аргоновой плазмы в стабилизированной атмосферной дуге. Измерение выполнено модифицированным методом вольт-амперных характеристик с использованием участка стабилизированной дуги в анодном канале плазматрона постоянного тока с распределённой анодной привязкой. На основании анализа литературных данных выявлена температурная зависимость проводимости аргона, по которой оценена средняя температура плазмы на выходе из плазматрона. В настоящей работе проанализированы 5 дополнительных экспериментальных исследований, совокупность результатов которых привела к коррекции итоговой зависимости [1] по проводимости аргона, понизив её до 45 % и соответственно уточнив значения средней температуры плазмы на срезе анодного канала плазматрона. Полученная поправка позволит увереннее анализировать механизмы технологических процессов, которые планируется проводить с использованием данного плазматрона.

**Ключевые слова:** Электрическая дуга, стабилизирующий канал, вольт-амперная характеристика дуги, положительный столб разряда, напряжённость электрического поля, проводимость плазмы, кинетическая теория плазмы, метод Чепмена-Энскога решения уравнения Больцмана.

#### Введение

В работе [1] измерена средняя по сечению стабилизированного дугового канала электропроводность аргоновой плазмы при атмосферном давлении. Использовался модифицированный метод вольтамперных характеристик дуги постоянного тока, возбуждённой в разрядном пространстве высокоресурсного Т-плазматрона [2]. Основная особенность этого устройства состоит в том, что на выходе из анодного канала плазматрона организована диффузная анодная привязка дуги, представляющей собой газо-вихревую зону, где резко снижается плотность тока и скорость эрозии материала анода. Схема Т-плазматрона, выполненная в масштабе с указанием размеров основных элементов и с наложением схемы распределения электрического потенциала в разрядном пространстве, представлена на рис. 1. Здесь роль стабилизирующего дугового канала играет анодное отверстие, причём локализацию анодной привязки разряда в плазматроне легко определить визуальным наблюдением «автографа» дуги на поверхности анода, прилегающей к его каналу.

В начальной стадии эксперимента [1] анодный канал имел длину  $l_{анн}=4$  мм (см. рис. 1). Была зарегистрирована вольтамперная характеристика дуги  $U_F(I)$  для  $I=40\dots 200$  А при внешнем расположении распределённой анодной привязки дуги, как показано на рис. 1.

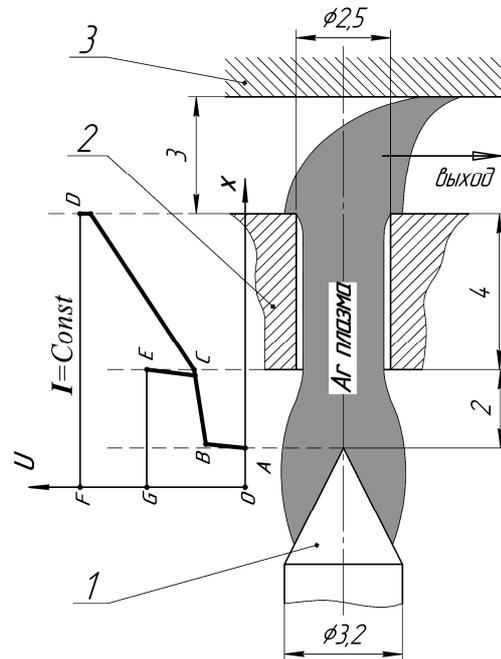


Рис. 1. Схема дугового разряда в Т-плазматроне (1-катод, 2 и 3 – закороченные анод и антианод)

Затем был установлен анод с каналом вдвое большей длины  $l_{анн}=8$  мм. Вместо ожидавшегося увеличения напряжения дуги была получена ВАХ  $U_G(I)$ , которая оказалась ниже  $U_F(I)$ , а осмотр анода выявил локальный и частично оплавленный «автограф» дуги внутри. Это означает, что во втором

случае была возбуждена традиционная свободная дуга с контрагированной анодной привязкой. Известно, что для разряда такой формы и при тех же условиях по давлению аргона и току свободной дуги прианодный скачок потенциала  $\Delta U_a \approx 6$  В [3]. Знание этой величины, обозначенной как отрезок СЕ на рис. 1, позволяет найти разность электрических потенциалов на анодном канале  $U_D - U_C$  в предположении малости анодного скачка потенциала в диффузном анодном пятне. С точностью до этого предположения с помощью закона Ома была найдена средняя проводимость плазмы в анодном канале  $T$ -плазматрона.

Недостаточная определённость последнего шага потребовала сравнения полученных данных с независимой информацией из [4] путем экстраполяции результатов данной работы для диаметров дугового канала 8, 6 и 4 мм на диаметр 2,5 мм, применявшийся в [1]. Итог оказался положительным (рис. 2): по общему уровню проводимости обе группы результатов совпали, отличаясь наклоном зависимости. В [1] истинными сочли собственные измерения, поскольку данные [4] были получены экстраполяцией, что может внести трудно контролируемую погрешность.

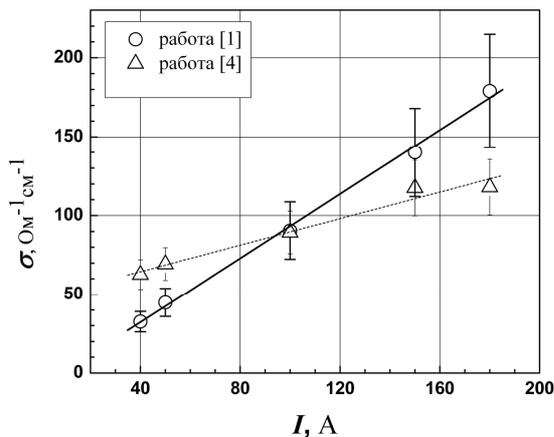


Рис. 2. Зависимость проводимости аргона от тока дуги по данным [1] и [4]

Далее оценка средней температуры плазмы на срезе анодного канала была проведена графически по температурной зависимости проводимости аргона  $\sigma(T)$  при  $P=1$  атм. В качестве экспериментальной информации для выявления этой зависимости использовались данные [4], где измерялись средняя проводимость аргона и температурные профили в стабилизирующих каналах разных диаметров. Для получения экспериментальной функции  $\sigma(T)$  температурные профили [4] были численно проинтегрированы. Отметим, что если электрические измерения в [4] были достаточно точны, то со спектральными данными ситуация сложнее: полученные про-

фили температур относительно надёжны вблизи оси и оборваны при подходе к стенкам каналов дуги. Как показано ниже, погрешности такой обработки измерений в дуге существенно больше.

Найденная экспериментальная зависимость  $\sigma(T)$  сравнивалась с теоретическими данными нескольких авторов (рис. 3):

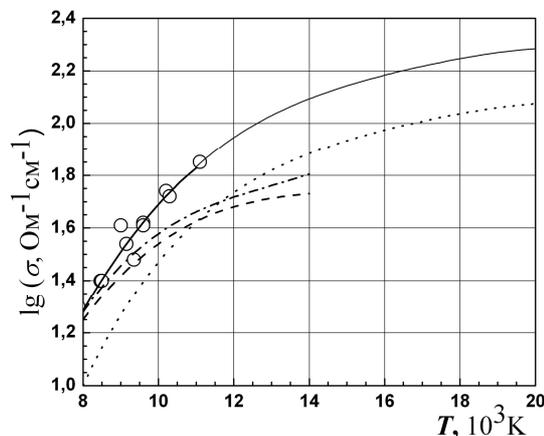


Рис. 3. Результаты работы [1] (кружки – эксперимент [4]; расчёты: точки – [5], пунктир – [6], штрих-пунктир – [7]; сплошная линия – данные [5] с  $K_\sigma=1,6$ )

Видно, что характер эксперимента наилучшим образом отражают результаты [5], равномерно занижающие проводимость аргона примерно на 45%. На этом основании искомая функция  $\sigma(T)$  была представлена в [1] расчётной кривой [5] с поправочным множителем  $K_\sigma=1,6$ .

В итоге было установлено, что при охваченном в [1] диапазоне значений средней проводимости аргона  $\bar{\sigma} = 30 \dots 180$   $\text{Ohm}^{-1}\text{cm}^{-1}$  изменение средней температуры плазмы соответствовало диапазону температур  $\bar{T} = 9000 \dots 18000$  К.

### Предварительная коррекция результата [1] по проводимости аргона

Перед уточнением оценки средней температуры плазмы на выходе из плазматрона необходимо внести некоторую коррекцию в результат [1] по проводимости аргона в связи с возможным частичным отбором тока разряда в проводящее тело анода – см., например, [8]. Из сути данного явления следует, что при стабилизации дуги «плавающими» секциями разрядного канала они работают как короткозамкнутые двойные макрозонды Ленгмюра, отбирая в себя некоторую, относительно небольшую долю тока разряда, что приводит к снижению проводимости плазмы в стабилизирующем канале, поскольку ток в плазме, окружённой этой секцией, всегда меньше тока в цепи питания дуги.

В варианте разряда настоящей работы со стабилизирующим каналом в виде анодного отверстия отбор тока дуги должен быть намного интенсивнее, т.к. здесь в любой точке контакта плазма-анод последний всегда положительнее плазмы, собирая значительный ток электронов. Видимо, по этой причине экстраполированная проводимость [4] при токах  $I=150$  и  $180$  А оказалась ниже соответствующих результатов настоящей работы на 15% и 30% соответственно. В связи с тем, что интенсивность отбора тока анодом в варианте настоящей работы пока не известна, было решено понизить измеренную в [1] зависимость  $\bar{\sigma}(I)$  до уровня данных [4] для верхних значений тока дуги. Проводимость [4] при малых токах не учитывалась, т.к. здесь экстраполяция на  $d_a=2,5$  мм могла быть недостаточно надёжной. Скорректированная таким образом итоговая зависимость  $\bar{\sigma}(I)$  в виде сплошной утолщённой линии представлена на рис. 4:

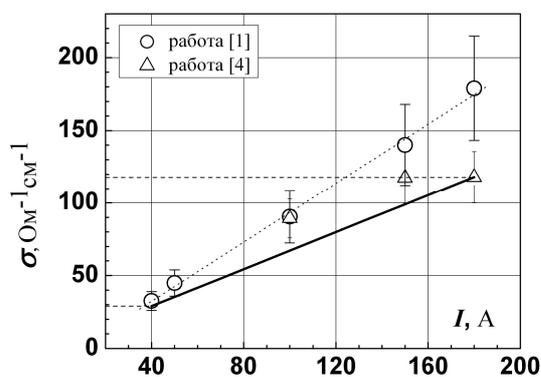


Рис. 4. Скорректированный результат [1] в виде сплошной утолщённой линии

Естественно, её следует рассматривать как оценку по верхней грани, потому что отбираемая в анод часть тока дуги может быть больше, а проводимость плазмы — меньше.

Таким образом, измеренный в [1] верхний предел проводимости аргона, равный  $180$  Ом<sup>-1</sup>см<sup>-1</sup>, снизился до  $\bar{\sigma} \approx 120$  Ом<sup>-1</sup>см<sup>-1</sup>.

### Анализ экспериментальных данных по зависимости $\sigma(T)$ для аргона

Эксперимент [4], привлечённый в работе [1], имеет неопределённость, возникающую при интегрировании неполных температурных профилей в дуговом канале. Кроме того, для достижения объективности и достоверности результата по температурной зависимости проводимости аргона  $\sigma(T)$  представляется необходимым сопоставление экспериментальных данных нескольких независимых экспериментальных работ. В этой связи был предпринят отдельный поиск соответствующей литературы.

#### 1. Ударно-волновой эксперимент [9], 1955 г.

Проводился в ударно-волновой трубе, работающей на аргоне при начальном давлении газа  $\sim 10$  Торр. Измерения проводились за фронтом падающей ударной волны, где давление достигало  $P \approx 1$  атм. Измерения электропроводности выполнялись бесконтактным индукционным методом с помощью измерительной катушки, охватывавшей стеклянный корпус трубы и помещённой в магнитное поле рассеяния короткого соленоида постоянного тока, создававшего продольное магнитное поле напряженности до  $8000$  Э. При движении в трубе проводящей газовой пробки за ударной волной поток плазмы взаимодействовал с радиальной составляющей постоянного магнитного поля соленоида, создавая в плазме кольцевой ток, наводивший соответствующий сигнал в измерительной катушке. Последнюю заранее калибровали прострелами алюминиевого стержня, моделировавшего плазму. Расшифровка осциллограмм сигнала измерительной катушки при известной скорости ударной волны давала проводимость плазмы с погрешностью не хуже 20% (точность калибровки составляла около 10%). Температура плазмы определялась по скорости ударной волны, которая фиксировалась методом скоростной съёмки с погрешностью в пределах  $\pm 2\%$ . При этом ошибка по температуре составляла около  $100 \dots 200$  К. Т.о. проводимость аргона и его температура определялись здесь независимыми измерениями, результаты которых представлены набором экспериментальных точек на итоговом графике рис. 5 (кружки):

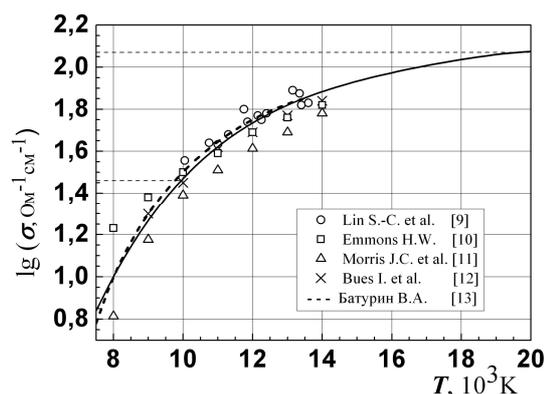


Рис. 5. Искомая зависимость  $\sigma(T)$  для аргона (сплошная кривая — из работы Р.С. Девото [5])

#### 2. Измерения в стабилизирующем канале электро-дугового плазматрона [10-13], 1967-1970 гг.

В случае электродуговой плазмы, существенно неоднородной в стабилизирующем канале, прямое получение средних величин проводимости и температуры затруднено сложным характером связи функции  $\sigma(T)$  с интегральными параметрами  $I$  и

$\bar{\sigma}$  через функцию  $T(r)$  – см. выражение для средней плотности тока по закону Ома:

$$\bar{j} = \bar{\sigma}E = I / \pi R^2 = (2R^{-2} \int_0^R \sigma[T(r)]rdr)E,$$

где  $R$  – радиус стабилизирующего канала,  $E$  – напряжённость электрического поля.

В экспериментах [10 – 13] измеряемыми параметрами были напряженность электрического поля  $E(I)$  и  $T(r)$  для некоторого набора значений тока дуги. Нахождение подынтегральной функции  $\sigma(T)$  при известных интегральных величинах результатов измерений ( $I$  и  $\bar{\sigma}$ ) есть обратная задача, которую можно решать несколькими способами. Чаще всего задавался вид функции  $\sigma(T)$  с несколькими параметрами, которые подбирались по набору результатов измерений. Численное решение заканчивалось при достижении разности расчётного и измеренного токов в несколько процентов. В [13] для проверки точности решения задавалась некоторая теоретическая функция  $\sigma(T)$ , и расчёт заканчивался нахождением её априори известных параметров. В этой работе показано, что переопределение задачи (по количеству результатов измерений) приводит к усреднению неточностей получения отдельных точек, а это повышает достоверность результатов.

Сравнение экспериментов [9 – 13] с теоретическим результатом [5] представлено на рис. 5. Видно, что привлечение к анализу более аккуратно обработанных данных измерений привёл к убедительному подтверждению предсказаний [5] без введения поправочного множителя. Отметим, что результаты [10 – 12] нанесены на графике рис. 5 точками условно с целью дать ясность графического представления. На самом деле они являются отрезками кривых  $\sigma(T)$ , полученных упомянутой выше расчётной обработкой интегральных результатов измерений.

Сравнение с [1] показывает, что выполненная в этой работе упрощенная обработка эксперимента [4] привела к заметному искажению искомой функции  $\sigma(T)$ .

На рис. 5 нанесены скорректированные границы измеренных в [1] величин средней проводимости аргоновой плазмы, которые указывают на уточненный диапазон средней температуры на выходе из плазматрона  $\bar{T} \approx 10000 \dots 19500$  К. Для сравнения: в [1] этот диапазон составил  $\bar{T} \approx 9000 \dots 18000$  К. Видно, что уточнение по температуре оказалось не слишком существенным, но промежуточная функция  $\sigma(T)$  изменилась при этом более заметно и стала значительно надёжнее.

## Заключение

Выполненная работа продолжает давнюю традицию измерений переносных свойств термической плазмы с использованием дугового разряда, стабилизированного набором электроизолированных, водоохлаждаемых металлических секций, измерение плавающих потенциалов которых позволяет получить распределение электрического потенциала в положительном столбе разряда.

Проведённые уточнения параметров аргоновой плазмы могут быть полезны для практических приложений нового плазматрона, который планируется применять для осуществления различных плазменных технологий.

## Литература

1. Измерение средней проводимости и температуры плазмы на срезе анодного канала электродугового плазматрона постоянного тока / В.А. Рябый, В.П. Савинов, А.В. Пацёра, Д.П. Ткаченко // Технологии электромагнитной совместимости. – 2009. – Т. 29, № 2. – С. 57-65.
2. Lee H.-J. The Volt-Ampere characteristics of a DC arc plasmatron with a distributed anode spot / H.-J. Lee, V. Yu. Plaksin, V.A. Riaby // Thin Solid Films. – 2007. – V. 515. – P. 5197-5201.
3. Финкельбург В. Электрические дуги и термическая плазма / В. Финкельбург, Г. Меккер; под ред. В.А. Фабриканта. – М.: ИИЛ, 1961. – 332 с.
4. Асиновский Э.И. Стабилизированные электрические дуги и их применение в теплофизическом эксперименте / Э.И. Асиновский, А.В. Кириллин, В.Л. Низовский. – М.: Наука, 1992. – 300 с.
5. Devoto R.S. Transport coefficients of partially ionized argon / R.S. Devoto // The Physics of Fluids. – 1967. – V. 10, No. 2. – P. 354-364.
6. Греков Л.И. Основные свойства некоторых газов при высоких температурах / Л.И. Греков, Ю.В. Москвин, В.С. Романычев, О.Н. Фаворский. – М.: Машиностроение, 1964. – 244 с.
7. Очерки физики и химии низкотемпературной плазмы / Под ред. Л. С. Полака. – М.: Наука, 1971. – 320 с.
8. Iermolova N.A. Physical aspects of dry plasma-chemical etching of photoresist in barrel type reactors / N.A. Iermolova, A.V. Maliarov, V.A. Riaby, V.P. Savinov, A.A. Sporykhin, L.N. Sheiko, V.G. Yakunin // Contr. Papers of the XXth ICPiG (Il Ciocco, Italy, 1991). – Pisa: Felici Editore, 1991. – V. 1. – P. 325-326.
9. Lin S.-C. Electrical conductivity of highly ionized argon produced by shock waves / S.-C. Lin, E. Resler, A. Kantrovitz // J. Appl. Phys. – 1955. – V. 26, no. 1. – P. 95-109.
10. Emmons H.W. Phys. Fluids. – 1967. – V. 10, no. 6. – P. 1125-1136.

11. Morris J.C. *Measurements of electrical and thermal conductivity of hydrogen, nitrogen, and argon at high temperatures* / J.C. Morris, R.P. Rudis, J.M. Yos // *Phys. Fluids*. – 1967. – V. 13, no. 3. – P. 608-617.

12. Bues I. *Über die elektrische Leitfähigkeit und die Wärmeleitfähigkeit des Argons bei hohen Temperaturen* /

I. Bues, H.J. Patt, J. Richter // *Zeitschrift für angewandte Physik*. – 1967. – Bd. 22, nr 4. – S. 345-350.

13. Батурич В.А. *Экспериментальное определение электропроводности плазмы аргона в стабилизированной дуге* / *Журнал прикладной механики и технической физики*. – 1970. – Т. 11, № 2. – С. 153-161.

Поступила в редакцию 1.06.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., зав. каф. И.П. Назаренко, Московский авиационный институт (государственный технический университет), Москва, Россия.

### УТОЧНЕНА ОЦІНКА СЕРЕДНЬОЇ ТЕМПЕРАТУРИ АРГОНОВОЇ ПЛАЗМИ НА ЗРІЗІ СОПЛА ВИСОКОРЕСУРСНОГО ПЛАЗМАТРОНУ

*I.V. Nikitinykh, V.A. Riaby*

У виконаній раніше роботі [1] було виміряне середню за перетином додатного стовпа дуги провідність аргонової плазми за умов атмосферного тиску. Вимірювання виконано модифікованим методом вольт-амперних характеристик з використанням ділянки стабілізованої дуги в анодному каналі плазматрона постійного току з розподіленою анодною прив'язкою. На основі аналізу експериментальних й теоретичних літературних даних було виявлено температурну залежність провідності аргону, за якою оцінено середню температуру плазми на виході з плазматрона. В даній роботі було проаналізовано п'ять додаткових експериментальних робіт, сукупність результатів яких призвела до корекції підсумкової залежності [1] за провідністю аргону, знизивши її до 45% та відповідно уточнивши значення середньої температури плазми на зрізі анодного каналу плазматрона у бік їх підвищення. Отримана поправка дозволяє уточнити механізми технологічних процесів, які плануються проводити з використанням даного плазматрона, а також підвищити точність модельних розрахунків, що проводяться як теоретичні прогнозування.

**Ключові слова:** електрична дуга, стабілізуючий канал, вольт-амперна характеристика дуги, додатний стовп розряду, напруга електричного поля, провідність плазми, кінетична теорія плазми, метод Чепмена-Енскога рішення рівняння Больцмана.

### REFINED ESTIMATION OF THE MEAN ARGON PLASMA TEMPERATURE AT THE NOZZLE EXIT OF THE LONG-LIFE PLASMATRON

*I.V. Nikitinykh, V.A. Riaby*

In the previous work [1] electrical conductivity of the atmospheric argon plasma averaged across the positive arc column was measured. Modified method of Volt-Ampere characteristics was employed using stabilized arc portion in the anode channel of a DC plasmatron with a spread anode spot. Analysis of experimental and theoretic conductivity data from literature disclosed temperature dependence of argon conductivity that allowed evaluation of the mean plasma temperature at the plasmatron exit. In the present work five additional experimental investigations have been studied that led to the correction of the conductivity function [1] decreasing conductivity values by up to 45%. This correction will help to understand better mechanisms of technologic processes that are planned to be carried out using this plasmatron. Besides it will raise the precision of model calculations that are usually carried out along with experiment as theoretic predictions.

**Key words:** electric arc, stabilizing channel, arc Volt-Ampere characteristic, positive discharge column, electrical field strength, plasma conductivity, kinetic plasma theory, Chapman-Enskog method of the Boltzmann equation solution.

**Никитиних Иван Витальевич** – студент 5 курса факультета двигателей летательных аппаратов Московского авиационного института (технического университета), Москва, Россия, e-mail: riame@sokol.ru.

**Рябий Валентин Анатольевич** – начальник лаборатории 21 НИИ прикладной механики и электродинамики Московского авиационного института (государственного технического университета), Москва, Россия, e-mail: riame@sokol.ru.